生物质能研究现状及未来发展策略

马隆龙[1*]　唐志华[1]　汪丛伟[1]　孙永明[1]　吕雪峰[2]　陈 勇[1]

1 中国科学院广州能源研究所 广州 510640

2 中国科学院青岛生物能源与过程研究所 青岛 266101

摘要　迫于能源短缺与环境恶化的双重压力，世界各国争相发展安全、环保、可再生的生物质能源。大规模开发利用生物质能源，对推动我国生态文明建设、能源革命和低碳经济发展，保障美丽乡村建设、应对全球气候变化等国家重大战略实施具有重要意义。文章在分析国内外生物质能发展现状和趋势的基础上，系统分析了我国发展生物质能面临的挑战，并探讨了未来发展生物质能应采取的策略及重点技术方向，研究结果可为我国生物质能源技术的快速发展提供理论支撑。

关键词　生物质能，现状与趋势，挑战与对策，发展重点

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.04.008

生物质能是一种重要的可再生能源，直接或间接来自植物的光合作用，一般取材于农林废弃物、生活垃圾及畜禽粪便等，可通过物理转换（固体成型燃料）、化学转换（直接燃烧、气化、液化）、生物转换（如发酵转换成甲烷）等形式转化为固态、液态和气态燃料[1]。由于生物质能具有环境友好、成本低廉和碳中性等特点，迫于能源短缺与环境恶化的双重压力，各国政府高度重视生物质资源的开发和利用。近年来，全球生物质能的开发利用技术取得了飞速发展，应用成本快速下降，以生物质产业为支撑的“生物质经济”被国际学界认为是正在到来的“接棒”石化基“烃经济”的下一个经济形态。因此，系统梳理生物质能技术的发展现状及趋势，明确我国发展生物质能面临的挑战并制定未来策略，对推动我国生态文明建设、能源革命和低碳经济发展，保障美丽乡村建设、应对全球气候变化等国家重大战略实施具有重要意义。

1 生物质能发展现状

随着国际社会对保障能源安全、保护生态环境、应对气候变化等问题日益重视，加快开发利用生物质能等可再生能源已成为世界各国的普遍共识和一致行

*通讯作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA21060000），国家自然科学基金重点项目（51536009）

修改稿收到日期：2019年3月26日

动，也是全球能源转型及实现应对气候变化目标的重大战略举措。生物基材料、生物质燃料、生物基化学品是涉及民生质量和国家能源与粮食安全的重大战略产品。2017年，全球生物基材料与生物质能源产业规模超过1万亿美元，美国达到4 000亿美元。美国规划2020年生物基材料取代石化基材料的25%；全球经济合作与发展组织（OECD）发布的“面向2030生物经济施政纲领”战略报告预计，2030年全球将有大约35%的化学品和其他工业产品来自生物制造；生物质能源已成为位居全球第一的可再生能源，美国规划到2030年生物质能源占运输燃料的30%，瑞典、芬兰等国规划到2040年前后生物质燃料完全替代石油基车用燃料[2]。

目前，世界各国都提出了明确的生物质能源发展目标，制定了相关发展规划、法规和政策，促进可再生的生物质能源发展。例如，美国的玉米乙醇、巴西的甘蔗乙醇、北欧的生物质发电、德国的生物燃气等产业快速发展。

经过多年的努力，我国科学家也在生物质能源的几个研究领域中占据国际领先或者齐平的地位[3-8]。在国家相关经费尤其是中国科学院战略性先导科技专项的支持下，中国科学院以具有颠覆性特色的木质纤维素原料制备生物航油联产化学品技术、支撑国家燃料乙醇和生物质燃料产业发展的农业废弃物醇烷联产技术为核心，突破关键技术并进行工业示范。针对低值生物质资源的高值利用难题，已建立了国际首套百吨级秸秆原料水相催化制备生物航油示范系统（图1），产品质量达到ASTM-D-7566（A2）标准，并拟于近年建成国际首套千吨级示范系统、千吨级呋喃类产品/异山梨醇的中试与工业示范、30万吨秸秆乙醇及配套热电联产工业示范、年千万立方米生物燃气综合利用与分布式供能工业化示范工程等一批体现技术特色、区域特色和产品特色的示范工程，进一步强化保持我国以上生物质能领域技术创新的国际领先地位。



图1　国际首套百吨级秸秆原料水相催化制备生物航油示范系统

生物质能技术主要包括生物质发电、生物液体燃料、生物燃气、固体成型燃料、生物基材料及化学品等，以下将针对各个具体技术的发展现状分别进行分析。

1.1 生物质发电技术

生物质发电技术是最成熟、发展规模最大的现代生物质能利用技术。目前，全球共有3 800个生物质发电厂，装机容量约为6 000万千瓦，生物质发电技术在欧美发展最为完善。丹麦的农林废弃物直接燃烧发电技术，挪威、瑞典、芬兰和美国的生物质混燃发电技术均处于世界领先水平。日本的垃圾焚烧发电发展迅速，处理量占生活垃圾无害化清运量的70%以上。

我国的生物质发电以直燃发电为主，技术起步较晚但发展非常迅速。截至2017年底，我国生物质发电并网装机总容量为1 476.2万千瓦，其中农林生物质发电累计并网装机700.9万千瓦，生活垃圾焚烧发电累计并网装机725.3万千瓦，沼气发电累计并网装机50.0万千瓦；我国生物质发电装机总容量仅次于美国，居世界第二位[2]。

1.2 生物液体燃料

生物液体燃料已成为最具发展潜力的替代燃料，其中生物柴油和燃料乙醇技术已经实现了规模化发展。

2017 年全球生物柴油的产量达到 3 223.2 万吨，美国、巴西、印尼、阿根廷和欧盟是生物柴油生产的主要国家和地区，其中欧盟的生物柴油产量占全球产量的 37%，美国占 8%，巴西占 2%。我国生物柴油生产技术国际领先，国家标准也已与国际接轨，但由于推广使用困难，导致目前国内生物柴油产量呈逐年下滑态势。

2017 年全球生物燃料乙醇的产量达 7 981 万吨，美国和巴西是燃料乙醇生产量最大的国家，产量分别为 4 410 万吨和 2 128 万吨。我国以玉米、木薯等为原料的 1 代和 1.5 代生产技术工艺成熟稳定，以秸秆等农林废弃物为原料的 2 代先进生物燃料技术已具备产业化示范条件，目前我国生物燃料乙醇产量约为 260 万吨/年，仅占全球总产量的 3%，仍然有较大的发展空间。

我国利用纤维素生产生物航油技术取得突破，实现了生物质中半纤维素和纤维素共转化合成生物航空燃油，目前已在国际上率先进入示范应用阶段[3,4]。利用动植物油脂为原料，采用自主研发的加氢技术、催化剂体系和工艺技术生产的生物航空燃油已成功应用于商业化载客飞行示范，这使我国成为世界少数几个拥有生物航空燃油自主研发生产技术并成功商业化的国家。

1.3 生物燃气技术

生物燃气技术已经成熟，并实现产业化。欧洲是沼气技术最成熟的地区，德国、瑞典、丹麦、荷兰等发达国家的生物燃气工程装备已达到了设计标准化、产品系列化、组装模块化、生产工业化和操作规范化。德国是目前世界上农村沼气工程数量最多的国家；瑞典是沼气提纯用于车用燃气最好的国家；丹麦是集中型沼气工程发展最有特色的国家，其中集中型联合发酵沼气工程已经非常成熟，并用于集中处理畜禽粪便、作物秸秆和工业废弃物，大部分采用热电肥联产模式[8]。

我国生物质气化产业主要由气化发电和农村气化供气组成。农村户用沼气利用有着较长的发展历史，但生物燃气工程建设起步于 20 世纪 70 年代。我国目前在生物质气化及沼气制备领域都具有国际一流的研究团队，如中国科学院广州能源研究所、中国科学院成都生物研究所、农业农村部沼气研究所、农业农村部规划设计研究院和东北农业大学等，这为相关研究提供了关键技术及平台基础。近年来，规模化生物燃气工程得到了较快的发展，形成了热电联供、提纯车用并网等模式。

1.4 固体成型燃料技术

欧美的固体成型燃料技术属于领跑水平，其相关标准体系较为完善，形成了从原料收集、储藏、预处理到成型燃料生产、配送和应用的整个产业链[9]。目前，德国、瑞典、芬兰、丹麦、加拿大、美国等国的固体成型燃料生产量均可达到 2 000 万吨/年以上。

我国生物质固体成型燃料技术取得明显的进展，生产和应用已初步形成了一定的规模。但近几年，我国成型燃料产业发展呈现先增后降趋势，全国年利用规模由 2010 年的 300 万吨增长到 2014 年的 850 万吨，2015 年后开始回落，主要是因为生物质直燃发电的环境效益受到争议，部分省份甚至限制了生物质直燃、混燃发电项目。此外，我国很多中小型成型燃料生产车间因为环境卫生不达标而被强制关停。

1.5 生物基材料及化学品

生物基材料及化学品是未来发展的一大重点，目前，世界各国都在通过多种手段积极推动和促进生物基合成材料的发展。随着生物炼制技术和生物催化技术的不断进步，促使高能耗、高污染的有机合成逐渐被绿色可持续的生物合成所取代，由糖、淀粉、纤维素生产的生物基材料及化学品的产能增长迅猛，主要是中间体平台化合物、聚合物占据主导地位[10]。我国生物基材料已经具备一定产业规模，部分技术接近国际先进水平。当前，我国生物基材料行业以每

年 20%—30% 的速度增长，逐步走向工业规模化实际应用和产业化阶段。

2 生物质能发展趋势

2.1 生物质能成本不断降低

预计到 2020 年前，生物质混燃发电的技术成本将低于燃煤发电；生物质直燃发电的技术成本在 2025—2030 年可与燃煤发电持平，生物质气化发电技术成熟时间约为 2030 年，可成为未来生物质发电的重要途径。生物质热电联产供热的成本到 2020 年前即可与燃煤供热全成本相当。生物质锅炉供热则需到 2025—2030 年才能与燃煤供热全成本相当。到 2020 年，养殖场畜禽粪便制取沼气的成本与天然气接近，其他生物质原料生产的沼气以及生物质热解气成本均可低于天然气，是未来天然气的有效补充。到 2022 年，以非粮淀粉类和糖类为原料的生物乙醇成本可与同时期汽油成本相当，到 2025—2030 年，纤维素乙醇的成本与同时期汽油成本相当[11]。

2.2 生物质液体燃料和生物燃气的大产业时代即将到来

生物质液体燃料被列为我国“十三五”重点项目；2018 年底，国家能源局向各省及 9 家央企下发了《国家能源局综合司关于请编制生物天然气发展中长期规划的通知》，生物质燃气被列入国家能源发展战略，生物质液体燃料和生物质燃气大规模替代化石能源的时代即将到来。美国计划到 2025 年生物质燃料替代中东进口原油的 75%，2030 年生物质燃料替代车用燃料的 30%；德国预计到 2020 年沼气发电总装机容量达到 950 万千瓦；日本计划在 2020 年前车用燃料中乙醇掺混比例达到 50% 以上；另外印度、巴西、欧盟分别制定了“阳光计划”“酒精能源计划”和“生物燃料战略”，加大生物质燃料的应用规模。预计到 2035 年，生物质燃料将替代世界约一半以上的汽、柴油，经济环境效益显著[12]。

2.3 高值化生物基材料及化学品越来越受重视

在市场经济和产业竞争激烈的今天，高值化生物质产品开发是生物质能发展趋势之一，如高品质生物航油、军用特种燃油增能添加剂、军用超低凝点柴油、己二酸、高分子单体乙二醇、低成本生物塑料和生物质染色剂等[13]。目前，我国生物质现代高值利用技术突破已经到了新时代，与发达国家技术同步发展，具备支撑产业的发展的基础。例如，大规模利用秸秆做生物航油、性能优良的生物基材料、高附加值化学品等技术已经领先于发达国家，具有经济竞争力，仍需进一步夯实国际领先地位。当前中美贸易摩擦正处于焦灼时刻，应紧紧抓住国际、国内发展战略机遇期，系统规划“另一半农业——农业生物质与生物质能源”的综合利用和发展策略，这将对我国社会经济的转型发展发挥重要作用。

2.4 多学科交叉，多技术深度融合发展

随着现代信息技术、生物技术、计算机技术、先进制造技术、高分子材料等领域取得的重大科学突破，“互联网+”“大数据”和“人工智能”将为生物质能发展带来新的机遇，多学科深度融合将成为未来发展的必然趋势，生物质能开发利用将呈现多元化、智能化和网络化的发展态势。

2.5 新型生物质大规模发展

随着生物质产业的飞速发展，传统生物质资源不足以支撑庞大的生物质资源需求，在高效循环利用传统农林生物质的基础上，必须发展新型生物质（如藻类和能源植物等）以满足产业发展需求。

3 我国生物质能面临的挑战

3.1 基础研究薄弱，源头创新不足

我国生物质发电在原料预处理及高效转化与成套装备研制等核心技术方面仍存在瓶颈。*① 生物质直燃发电技术方面。*我国在锅炉系统、配套辅助设备工艺等方面与欧洲国家还有较大差距，燃烧装置沉积结渣

和防腐技术需要突破；气化发电技术存在效率低、规模小、副产物处置难等缺点；混烧发电技术还没有建立完善的混烧比例检测系统、高效生物质燃料锅炉及其喂料系统。② 生物质液体燃料方面。我国纤维素原料燃料乙醇生产技术尚处于中试阶段；生物质合成燃料技术仍处于起步阶段；生物质液体燃料的转化反应机理、高效长寿命催化剂、酶转化等方面的基础研究薄弱，精制工艺和副产物回收技术开发力度不足，存在转化率不高、产品质量不稳定等问题。③ 生物质燃气方面。我国生物质制氢仍停留在实验室阶段，催化合成气技术处于中试阶段；沼气技术发展迅速，大中型沼气工程建设速度明显加快，但高效厌氧发酵技术、沼气提纯与储运技术需进一步提高。④ 生物质成型燃料方面。固体成型燃料的成型粘接机制和络合成型机理尚不清楚。⑤ 生物基化学品及材料方面。与国际先进水平相比，我国在产品性能、制造成本、关键技术集成与产业化规模等方面还存在较大差距。能源植物资源品种培育的分子遗传育种才刚起步，且对培育出来的优良品种的利用与推广较少[14,15]。

3.2 关键技术和装备国际依存度高

发达国家在生物质资源利用和产品制造领域已居于领先地位并且占领了产业主导权。为了维护其引领产业发展的战略地位和经济利益，发达国家普遍对生物质转化利用的核心技术进行封锁和垄断，我国很多关键技术（如生物质转化的纤维素酶、己二酸等平台化合物、高分子单体乙二醇、高性能低成本生物塑料单体技术和非金属仿真催化剂等）和关键设备（如流动反应器、集储设备的打结器、反应器自控系统等）依赖进口，导致生物质原料规模化生产、集储效率低，产业成本高[16]。

3.3 生物质资源未能高效利用成为污染源

我国每年约产生作物秸秆 9 亿吨，畜禽粪便 45 亿吨，林业三剩物① 4.5 亿吨，农业加工剩余物 1 亿吨，以及生活垃圾 2 亿吨。这些生物质资源大部分没能有效资源化利用，而是被露天焚烧或者随意丢弃，成为大气污染、水体污染和土壤污染的源头[17]。如果将这些有机废弃物转化成生物质能源或产品，每年可减少上千万吨的化学需氧量（COD）排放量，每年减少 CO_2 排放量约 20 亿吨、NO_x 排放量约 200 万吨、SO_2 排放量约 560 万吨、粉尘约 3 亿吨。

4 我国生物质发展对策

4.1 加强原始性创新，促进生物质高值综合利用

（1）生物质资源利用要走综合化、高值化的路径。在高值化的研究方面需要深入认识生物质不同营养组织、不同生长阶段的微观结构及其演变规律，探索生物质结构演变规律对解聚特性的影响。融合更多学科的知识与研究方法，多维度、多视角地对生物质的水热转化过程进行研究，逐步丰富与完善生物质水热催化转化理论与方法。树立多元化利用新理念，发展生物质资源高效转化为燃料、化学品、材料等多种产品的特色技术和理论体系。

（2）生物质综合利用重点是发展绿色制造、促进多能互补、开展工农一体化利用。绿色制造要以工业生物技术为核心，结合生物学、化学、工程学等技术，从生物质等原料出发，构建生产化学品、能源与材料的新工业模式。多能互补是建立适应社会可持续发展的“品级对口、多子相干、能势匹配、多能互补、碳氢循环”的能源转化利用新理念，构建洁净低碳、安全高效的国家能源供应与转化利用新体系，实现多能互补、提质增效的能源综合高效转化利用模式。生物质资源工农一体化利用是将生物燃料、肥料、饲料进行一体化设计，实现生物质全组分的高效转化与循环利用。

① 指采伐剩余物、造材剩余物和加工剩余物。

4.2 加强顶层设计，进行系统设计规划

发展生物质能技术，必须与美丽乡村建设、精准扶贫等国家重大战略相结合。要统筹考虑各种需求，协同考虑能源、资源、环境、生产模式、生活方式等，进行多元技术集成；要通过工业化的手段实现技术的规模化、组织化、装备化；采用市场化的运行模式，将资本运作、技术服务、商品交易等融入生物质能产业的发展中。必须转变农村零散化、个体化的生产生活模式，设计、规划与人居环境相耦合的集中养殖和集中种植区域，以农村废物循环代谢及资源化、能源化利用为控制要素，实现废物的近零排放与资源最大化利用，构建生产-生活-生态一体化协调发展的新的农村发展模式，以实现连片发展、协同发展、规模发展。

4.3 构建多种废物协同处理的能源化工系统

构建智能化、规模化多原料来源的物理、化学、生物转化一体的农村废弃物综合利用系统，改变传统单一处置模式，增进各种生物质的互补与融合，实现多种废弃物协同处置与多联产。主要包括：畜禽粪便-能源作物协同处置与能源化利用系统、农村垃圾-畜禽粪便-生物质废物协同处置与多联产系统、多联产技术产品深加工系统等，建设“代谢共生产业园”，实现区域内单一工程对各类乡村废物处置利用，实现各类农村废物全量协同资源化利用，将农林废弃物转化为可燃气、化工原料、有机肥及其他资源，提高农村废弃物综合利用的有效性和经济性。

4.4 加强国际交流与合作

引进国外先进的生物质利用技术和设备，并进行消化、吸收和再创新，加快研制生物质关键技术和装备，打破国际垄断，建立拥有自主知识产权的技术体系，建立符合中国国情的生物质能开发利用结构体系；加强平台建设并完善技术创新体系，依托科研院所、大学和大型骨干企业，联合国内相关机构，组建工程技术中心及重点实验室。设立重大科技专项，对农林废物能源化工系统、生活固废综合利用系统、特色农林废物资源化系统、畜禽粪便能源化工系统、多种废物协同处置与多联产系统及能源植物选种育种与利用系统等技术方向的关键技术开展技术攻关。推进生物质能人才培育纳入人才规划纲要，特别是针对能源植物、生物质功能材料利用领域的科研人才。

5 我国生物质未来发展重点

5.1 生物液体燃料

突破农林畜牧废弃物转化为航空煤油、生物柴油和乙醇等生物质液体燃料的能源化工关键技术，加快推进生物质液体燃料清洁制备与高值化利用技术产业化。加快推进新一代木质纤维素生物航油技术研发和标准制定，打破发达国家在传统航油、费托合成油、油脂生物航油技术壁垒，提升我国生物航空燃油产业的国际竞争力；创新解决新型生物质能源的培养与转换技术，掌握藻转化制取液体燃料的反应调控机制及改性提质原理，突破产油微藻核心性状的遗传多样性、进化途径与诱变育种技术，显著提高燃料的转化效率，使得微藻固碳制油成本显著降低；加快燃料乙醇推广应用，促进原料多元化供应，适度发展非粮燃料乙醇；升级改造生物柴油项目，加快推进生物柴油在交通领域的产业化应用。未来，生物质转化为液体燃料的技术将取得重大突破，一大批示范工程和产业基地将建立，生产规模将达到年产千万吨级以上。

5.2 生物天然气

结合国家调整能源消费结构、减排克霾、乡村振兴的需要，推进生物天然气技术进步及商业化。突破高负荷温度厌氧消化及“三沼”利用等关键技术，实现各项技术优化及工程示范推广；建立高负荷厌氧消化稳定控制系统，加强厌氧消化过程生物强化制剂研究，突破严寒地区中温厌氧消化恒温补偿机理；开展沼气集中供气、热电联供、纯化车用及入网成套关键技术研发，突破沼气生物甲烷化原位脱碳及制备化工

产品关键技术，实现沼气能源化工利用；通过移动式沼气提纯及吸附式储运关键技术研发，突破沼液水肥一体化施用、浓缩调质制水溶肥及沼液氮磷矿化回收和生产饲料/材料关键技术，实现沼液养分回收利用；突破保氮保水等生物有机肥制备关键技术，开展催腐、除臭、保水、保氮堆肥专用菌剂研究，突破模块化移动式堆肥装备研发关键技术，实现通过沼渣生产功能有机肥。开展规模化生物天然气工程和大中型沼气工程建设，落实沼气和生物天然气增值税即征即退政策，支持生物天然气和沼气工程开展碳交易项目。

5.3 生物基材料及化学品

针对生物基材料产品功能单一、产品性能和附加值低等问题，利用农林生物质资源，重点突破纤维素/木质素大分子动态键合、活性可控聚合、天然大分子自组装及可控光催化聚合等定向合成及功能化改性关键技术，创制具有高机械强度、光磁、抗菌、环境响应、自修复、缓释等性能的化学品，构建高性能、高附加值产品技术体系，实现生物质原料对石化原料的大规模替代；突破提取剩余物热解制备生物炭关键技术，生物炭物理活化与高效利用关键技术及生物炭制备过程能量自给系统关键技术，加快推动生物炭功能材料利用；加快推进特色有机废物（如板栗壳、椰壳、虾头、葛根等）的高值化利用。

5.4 固体成型燃料供热

针对我国固体成型燃料现状，形成从秸秆原料收集、储存、运输成型、配送到高效转化的完善产业链。通过技术研发掌握生物质成型粘接机制和络合成型机理，实现生物质成型燃料的高品质化和低能耗化。加强大型生物质锅炉低氮燃烧关键技术进步和设备制造，推进设备制造标准化系列化成套化。加强检测认证体系建设，强化对工程与产品的质量监督。

5.5 生物质发电

进一步完善适合我国国情的秸秆燃烧发电技术和配套设施，使秸秆燃烧发电的效率和运行时间与燃煤电厂接近；掌握生物质燃烧装置沉积结渣和腐蚀特性，改善生物质直燃项目的运行品质和可靠性。突破低结渣、低腐蚀、低污染排放的生物质直燃发电技术、混燃发电计量检测技术与高效洁净的气化发电技术，并通过技术装备创新实现大规模产业化应用。加快推进清洁环保的垃圾焚烧发电技术，积极建设垃圾填埋气发电项目，因地制宜推进沼气发电项目建设，综合利用工业有机废水和城市生活污水生产沼气并发电。提高生物质热电联产的效率，积极推动生物质分布式能源系统建设。

6 结语

作为可再生能源的“核心”，生物质能的开发利用不仅能改善生态环境，有力支撑美丽宜居乡村建设，同时可解决我国农村的能源短缺，推进农村能源革命，并促进绿色农业发展，创造新的经济增长点，是实现能源、环境和经济可持续发展的重要途径。在新时代，生物质资源利用要走综合化、高值化的路径。紧紧围绕城乡一体化发展、乡村振兴与环境污染治理重大需求，通过科学技术突破，尤其是基础科学发现，找到生物质高值利用的新路径，找到生物质产业发展的新方案。重点瞄准生物基材料、化学品、高品质燃料等高值化的转化途径，依靠科技创新增加产业附加值，实现生物质产业的转型升级。目前生物质能产业正处于技术攻坚和商业化应用开拓的关键阶段，生物质能的发展需结合我国实际情况，面对各种挑战，做好顶层设计，把握具有基础性、前瞻性的技术发展方向，创新发展模式，为我国生物质能产业的快速发展提供科技支撑。

参考文献

1 马隆龙. 生物质能利用技术的研究及发展. 化学工业, 2007, 25(8): 9-14.

2 Berndes G, Hoogwijk M, Broek R. The contribution of

biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(1): 1-28.

3 马隆龙, 刘琪英. 草本能源植物培育及催化制备先进液体燃料. 科技创新导报, 2016, 13(10): 165-166.

4 马隆龙, 刘琪英. 糖类衍生物催化制液体烷烃燃料的基础研究. 科技创新导报, 2016, 13(10): 163-164.

5 Fu M C, Shang R, Zhao B, et al. Photocatalytic decarboxylativealkylations mediated by triphenylphosphine and sodium iodide. Science, 2019, 363: 1429-1434.

6 Li F, Li X L, Li C, et al. Aerobic oxidative esterification of 5-hydroxymethylfurfural to dimethyl furan-2,5-dicarboxylate by using homogeneous and heterogeneous PdCoBi/C catalysts under atmospheric oxygen. Green Chemistry, 2018, 20: 3050-3058.

7 Sun M T, Yang Z M, Fan X L, et al. Improved methane elimination by methane-oxidizing bacteria immobilized on modified oil shale semicoke. Science of the Total Environment, 2018, 655: 915-932.

8 Li Z G, Han C, Gu T Y. Economics of biomass gasification: A review of the current status. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2018, 13(2): 137-140.

9 袁振宏, 雷廷宙, 庄新姝, 等. 我国生物质能研究现状及未来发展趋势分析. 太阳能, 2017, (2): 12-19.

10 Kumar M, Oyedun A O, Kumar A. A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(2): 1742-1770.

11 秦世平, 胡润青. 中国生物质能产业发展路线图2050. 北京: 中国环境出版社, 2015: 1-200.

12 Mao G, Huang N, Chen L, et al. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1081-1090.

13 Sahota S, Shah G, Ghosh P, et al. Review of trends in biogas upgradation technologies and future perspectives. Bioresource Technology Reports, 2018, (1): 79-88.

14 Khan M I, Shin J H, Kim J D. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. Microbial Cell Factories, 2018, 17(1): 36.

15 中国可再生能源发展战略研究项目组. 中国可再生能源发展战略研究丛书: 生物质能卷. 北京: 中国电力出版社, 2008: 11-305.

16 国家发展和改革委员会能源研究所, 国家可再生能源中心, 中国可再生能源学会. 中国可再生能源发展路线图2050. [2014-12-25]. http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2014-12-25-456.html.

17 杜祥琬, 周大地. 中国的科学、绿色、低碳能源战略. 中国工程科学, 2011, 13(6): 4-10.

Research Status and Future Development Strategy of Biomass Energy

MA Longlong[1*] TANG Zhihua[1] WANG Congwei[1] SUN Yongming[1] LYU Xuefeng[2] CHEN Yong[1]

（1 Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2 Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China）

Abstract Under the dual pressure of energy shortage and environmental degradation, countries all over the world compete to develop safe, environmentally friendly and renewable biomass energy. Large-scale development and utilization of biomass energy can greatly promote ecological civilization construction, energy revolution and low-carbon economic development, and it is of great significance for ensuring national strategies (such as the beautiful villages construction, coping with global climate change, etc.) implementation in China. With an analysis of the status and trend of biomass energy development as the beginning, this study systematically analyzes the challenges of biomass energy development faced by China, and discusses the corresponding countermeasures China should adopt. Furthermore, the technical direction of biomass development are mentioned. The review can provide scientific and technological support for the rapid development of biomass energy technology in China.

Keywords biomass energy, status and trends, challenges and countermeasures, development priority



马隆龙 中国科学院广州能源研究所所长，研究员。“973”项目首席科学家，首批“万人计划”科技创新领军人才入选者。中国科技大学兼职教授，博士生导师。“十二五”“863”计划“农林生物质高效转化技术”主题专家组专家，“十三五”国家重点研发计划“可再生能源与氢能重点专项”专家组专家，生物质能源产业技术创新战略联盟理事长，国家能源生物燃料中心主任，中国可再生能源学会生物质能专业委员会副主任委员。主要研究领域为生物质高效转化与高值利用研究，在生物质催化解聚、平台化合物水相转化烃类燃料和化学品过程的多相反应体系、催化过程理论及工程验证研究等方面取得了一系列创新性成果，在国际国内形成了重要影响。E-mail: mall@ms.giec.ac.cn

MA Longlong Professor, Ph.D., Director General of Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Guangzhou, China. He has been working in the field of transformation technology for biomass energy for more than 20 years. His research focuses on the bio-energy from biomass feedstocks, including the liquid hydrocarbon fuels from bio-syngas, bio-oil production and up-grading from biomass pyrolysis, biofuel and chemicals from lignin conversion. Especially, Prof. Ma is the subject expert board of highly efficient conversion of biomass of the “12th Five-Year Plan” of China, and the expert board of strategic research and design of the “13th Five-Year Plan” in modern agricultural technological area, the Ministry of Science and Technology of China. Besides, he is team leader of the expert team of special planning of biomass energy, standing director of China Renewable Energy Society, Chairman of Innovation Strategic Alliance of Biomass Energy Industrial Technology. E-mail: mall@ms.giec.ac.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author

参考文献（双语版）

1 马隆龙. 生物质能利用技术的研究及发展. 化学工业, 2007, 25(8): 9-14.
Ma L L. Process technology of bio-energy utilization and its development. Chemical Industry, 2007, 25(8): 9-14. (in Chinese)

2 Berndes G, Hoogwijk M, Broek R. The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(1): 1-28.

3 马隆龙, 刘琪英. 草本能源植物培育及催化制备先进液体燃料. 科技创新导报, 2016, 13(10): 165-166.
Ma L L, Liu Q Y. Advanced liquid fuel production by herbage energy plant breeding and catalytic transformation. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(10): 165-166. (in Chinese)

4 马隆龙, 刘琪英. 糖类衍生物催化制液体烷烃燃料的基础研究. 科技创新导报, 2016, 13(10): 163-164.
Ma L L, Liu Q Y. Basic research on liquid alkanes from sugar derivatives by aqueous phase catalysis. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 13(10): 163-164. (in Chinese)

5 Fu M C, Shang R, Zhao B, et al. Photocatalytic decarboxylative alkylations mediated by triphenylphosphine and sodium iodide. Science, 2019, 363(6434): 1429-1434.

6 Li F, Li X L, Li C, et al. Aerobic oxidative esterification of 5-hydroxymethylfurfural to dimethyl furan-2,5-dicarboxylate by using homogeneous and heterogeneous PdCoBi/C catalysts under atmospheric oxygen. Green Chemistry, 2018, 20(13): 3050-3058.

7 Sun M T, Yang Z M, Fan X L, et al. Improved methane elimination by methane-oxidizing bacteria immobilized on modified oil shale semicoke. Science of the Total Environment, 2019, 655: 915-923.

8 Li Z G, Han C, Gu T Y. Economics of biomass gasification: A review of the current status. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2018, 13(2): 137-140.

9 袁振宏, 雷廷宙, 庄新姝, 等. 我国生物质能研究现状及未来发展趋势分析. 太阳能, 2017, (2): 12-19.
Yuan Z H, Lei T Z, Zhuang X S, et al. Research status and future development trend of biomass energy in China. Solar Energy, 2017, (2): 12-19. (in Chinese)

10 Kumar M, Oyedun A O, Kumar A. A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1742-1770.

11 秦世平, 胡润青. 中国生物质能产业发展路线图2050. 北京: 中国环境出版社, 2015.
Qin S P, Hu R Q. China Biomass Energy Industry Development Roadmap 2050. Beijing: China Environmental Press, 2015: 1-200. (in Chinese)

12 Mao G Z, Huang N, Chen L, et al. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1081-1090.

13 Sahota S, Shah G, Ghosh P, et al. Review of trends in biogas upgradation technologies and future perspectives. Bioresource Technology Reports, 2018, 1: 79-88.

14 Khan M I, Shin J H, Kim J D. The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. Microbial Cell Factories, 2018, 17(1): 36.

15 中国可再生能源发展战略研究项目组. 中国可再生能源发展战略研究丛书: 生物质能卷. 北京: 中国电力出版社, 2008: 11-305.
Research Group of China Renewable Energy Development Strategy. China’s Renewable Energy Development Strategy Research Series: Biomass Energy. Beijing: China Electric

Power Press, 2008: 11-305. (in Chinese)

16 国家发展和改革委员会能源研究所, 国家可再生能源中心, 中国可再生能源学会. 中国可再生能源发展路线图2050. [2014-12-25]. http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2014-12-25-456.html.

Energy Research Institute of National Development and Reform Commission, National Renewable Energy Center, China Renewable Energy Society. China renewable energy development roadmap 2050. [2014-12-25]. http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2014-12-25-456.html. (in Chinese)

17 杜祥琬, 周大地. 中国的科学、绿色、低碳能源战略. 中国工程科学, 2011, 13(6): 4-10.

Du X W, Zhou D D. China's scientific, green and low carbon energy strategy. Engineering Sciences, 2011, 13(6): 4-10. (in Chinese)